

第 14 卷第 9 期  
2008 年 9 月

计算机集成制造系统  
Computer Integrated Manufacturing Systems

Vol. 14 No. 9  
Sep 2008

文章编号:1006-5911(2008)09-1766-08

# 自动小车存取系统中轨道导引 小车环路死锁控制的研究

吴长庆,何善君,罗 键

(厦门大学 信息科学与技术学院,福建 厦门 361005)

**摘 要:**为防止自动小车存取系统中轨道导引小车环路死锁现象,提出了一种基于 Petri 网和有向图的死锁控制方法。该方法首先应用有色赋时 Petri 网建立了自动小车存取系统的动态模型,并结合有向图工具,阐述了导致环路死锁的原因。在此基础上,针对单一轨道双向运行的轨道导引系统,探讨了其环路死锁的主要表现形式,给出了轨道导引小车无死锁运行的充要条件,并提出了包含临界状态在内的死锁避免控制策略。最后,结合实例说明了环路死锁控制的有效性。

**关键词:**自动小车存取系统;轨道导引小车系统;有色赋时 Petri 网;有向图;环路死锁

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A

## Cycle-deadlock control of RGVs in autonomous vehicle storage and retrieval systems

WU Chang-qing, HE Shan-jun, LUO Jian

(School of Information Science & Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** To avoid the cycle-deadlock of the Rail-Guided Vehicles (RGVs) systems in Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems (AVS/RS), a deadlock control modeling method based on Petri nets and directed graph was proposed. The dynamic model of AVS/RS was constructed by using Colored Timed Petri Nets (CTPN). And by using directed graph tools, the cycle-deadlock was described. To deal with RGVs systems with single rail and two directions, forms of cycle-deadlock were also discussed. Moreover, the necessary and sufficient conditions for RGVs deadlock-free were presented, and the deadlock-free control policies including critical state were also proposed. Finally, a case study was given to validate the effectiveness of the proposed policy.

**Key words:** autonomous vehicle storage and retrieval systems; rail-guided vehicles systems; colored timed Petri nets; directed graph; cycle-deadlock

## 1 问题的提出

自动化仓库是现代集成制造系统的组成部分。因为堆垛机能同时进行水平和垂直运动,存取效率较高,所以传统的自动化仓库一般采用堆垛机存取货物,称为自动存取系统(Automated Storage and Retrieval Systems, AS/RSs)。然而,堆垛机只能服务单一的巷道,若发生故障,该巷道则无法进行出入库操作,使整个仓库运行效率受到影响。而自动小

车存取系统(Autonomous Vehicle Storage and Retrieval Systems, AVS/RS)是利用轨道导引小车(Rail-Guided Vehicles, RGVs)在物流仓库货位间的轨道上作水平运动实现货物的出入库操作,其垂直运动是依靠安置在仓库边缘的升降机系统来完成的。AVS/RS主要包括RGVs、升降机系统和货架,以及货物缓存区,如图1<sup>[1]</sup>所示。与AS/RS相比,虽然AVS/RS运行效率相对较低,但价格低且柔性化更高,每台RGV可以服务任意货位,不会因为某辆小车故障而影响整个仓库的出入库操作;另外,用

收稿日期:2007-11-06;修订日期:2008-01-16。Received 06 Nov. 2007; accepted 16 Jan. 2008.

作者简介:吴长庆(1982—),男,福建晋江人,厦门大学信息科学与技术学院博士研究生,主要从事物流自动化系统的研究。

E-mail: king7779@sina.com。

户还可以根据业务量调整小车运行的数量<sup>[2]</sup>。AVS/RS自2000年后逐渐在欧洲开始受到关注,并且已有实际应用。

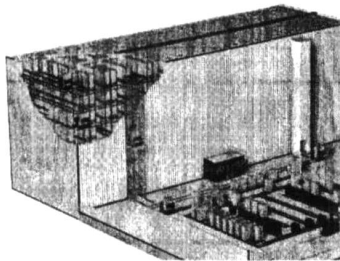


图1 AVS/RS的立体简图

## 2 相关研究

相对于AS/RS,AVS/RS是一种新的单容量存取系统,目前对于它的研究主要集中在概念模型设计方面。美国Rensselaer Polytechnic Institute的MALMBORG C J教授及其课题组在AVS/RS的概念模型研究上作了大量工作。他们从系统的代价和性能方面,应用分析AV/RS的方法构建了AVS/RS的设计框架模型<sup>[3]</sup>,并使用状态方程模型研究了交叉存取对AV/RS和AVS/RS的影响<sup>[4]</sup>;文献[5]对AVS/RS的概念模型进行了更加深入、系统的阐述,并对交叉存取的影响作了模型说明;文献[2]则以交叉存取为主干,建立了交叉存取模式下的循环时间模型,在此基础上使用排队论的方法,进行了理论分析和试验研究。但迄今对AVS/RS控制的动态模型都尚未进行深入的研究。

作为AS/RS的可替换系统<sup>[1]</sup>,AVS/RS也属于面向资源的离散事件系统。对于这类系统动态模型,Petri网已经证明了其有效性。文献[6]和文献[7]采用着色Petri网构建了AS/RS的动态模型,所获得的模型既可用于系统设计阶段离线性能评估,也可用作系统在线监控<sup>[6-7]</sup>;考虑到AS/RS的模块化,文献[8]应用着色Petri网(Colored Petri Nets, CPN)构建了AS/RS的模块化模型,各子模块间通过接口(fusion places)通信;为了使Petri网具有更强的可重用性和操作性,文献[9]~文献[12]把面向对象技术引入其中,提出了采用面向对象方法的CPN(Object Oriented CPN, OOC PN)来构建AS/RS模型。然而,自动化立体仓库输送系统是基于时间的离散事件动态系统(Discrete Event Dynamical System, DEDS),执行过程中的任务在各站台或其他位置上都需要一定的完成时间,而上

述研究均忽略这一点。文献[13]把时间这一要素引入到CPN中,以堆垛机和小车作为托肯,任务路径作为颜色,构建了AS/RS的动态模型<sup>[13]</sup>。不论采用着色或者面向对象的方法,其主要目的都是为了简化Petri网模型,在这方面着色方法表现得更有优势。然而,目前着色方法多种多样,出现这种现象的主要原因是CPN的着色概念在实际建模过程中比较模糊。实际上,从宏观物理结构上来看,着色简化了那些具有相同或类似物理结构的系统。而从微观上来说,每个库所的动态属性又需要被表示出来,这时的着色是对实际控制系统动态特性的必须描述方式,否则将导致有关信息的丢失。实际的控制系统其实涵盖了这两个方面,因此有必要进一步讨论Petri网的着色问题,以期获得更好的建模方法来准确地描述实际系统<sup>[14]</sup>。本文在完善文献[14]的理论基础上,提出应用着色赋时Petri网(Colored Timed Petri Nets, CTPN)构建AVS/RS动态模型的方法。

在AVS/RS中最主要的控制系统是RGVs,其中自动小车可以在任意层中沿着纵向和横向轨道作双向运动,如图2所示。除了垂直运动不同外,与通常讨论的自动导引小车系统(Automated Guided Vehicles System, AGVS)相似。关于AGVS死锁检测和消除一直是研究的热点<sup>[15-16]</sup>,但基本上讨论的是小车路径的回路死锁问题,回路由多个资源组成;而在AVS/RS中,RGV的死锁现象体现为环路死锁,即由两个资源构成环路;环路虽然是回路的特例,但是由多个环路组成环路链后,其死锁避免控制的方式与回路死锁控制就有很大的区别。文献[17]采用面向资源的Petri网构建AGVS小车路径的关系模型,然后分析了小车回路死锁和环路死锁的条件和避免算法<sup>[17]</sup>。然而,面向资源的Petri网模型对于小车路径的描述显得单薄,没有说明这些小车路径的关联,而且AVS/RSs比AGVS复杂,使用Petri网分析死锁问题计算量大且困难。FANTI等人在研究火车运行轨道路径时,针对环路死锁控制提出了防止一级死锁和二级死锁(Second Level Deadlock, SLD)控制的策略,并把广义互斥约束(Generalized Mutual Exclusion Constraints, GMEC)概念扩展到CPN模型,建立了闭环的监控模型。然而,正如FANTI等人所说的,这些约束条件最终可能导致严格死锁(Restricted Deadlock, RD),而随后引入的监控库所约束条件也未能彻底避免死锁现象。另

外,文献[13]和文献[18]研究的是多容量资源控制系统,多容量库所本身可以作为缓冲区域,当有多辆小车作业时有利于避免死锁。而本文的研究对象 RGVs 由于属单容量资源控制系统,每个位置资源容量都为 1,不能互为缓冲区域,且小车双向运行,使用上述方法无法防止死锁的发生。此外,当系统进入到环路的临界状态,对于文献[13]和文献[18]提出的控制策略,如文献[18]提出的死锁检测方法仍然无法检测出这种临界状态,进而造成系统的死锁,对于这样的系统需要进一步分析。

本文首先利用库所双重着色的 CTPN 方法构建 AVS/RS 动态模型<sup>[14]</sup>,然后在此基础上结合有向图工具,阐述了 RGVs 的环路死锁原因和系统无死锁的充要条件,并提出了相应的死锁控制方法。

为讨论方便,在不失一般性的情况下,假设如下: 小车运行轨道单一,且小车可双向运行; 小车路径由上层调度系统下达,一旦确定一般就不能改变,即小车的路径不是动态给定的; 在本系统中升降机只有一台; 不考虑 RGV 运行过程中的延迟、故障等干扰因素。

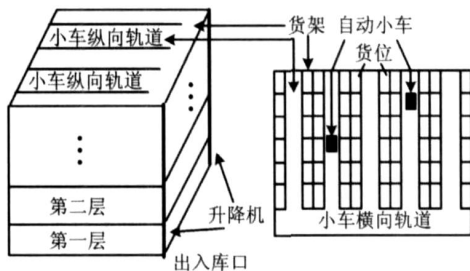


图2 AVS/RS的平面框架示意图

### 3 着色赋时 Petri 网构建 AVS/RS 动态模型的方法

CTPN 是一个九元组  $CTPN = (P, T, Co, Inh, C^+, C^-, Ti, Mo)$ 。其中  $P$  为有限库所集,  $P = P_p \cup P$ ,  $P$  为逻辑位置集,用于存放调度层下达的控制指令,这些指令包括下达给小车和升降机的路径指令,以及防止死锁产生的逻辑控制指令,如第 4 章描述的输入变迁使能标志指令;  $P_p$  为自动小车或者升降机运行中经过的物理位置集和所有货位。把小车和升降机可能停留的位置区域设定为节点,如图 3 所示,其中  $p_1, p_3, p_5, p_7$  和  $p_9$  为小车横向轨道和纵向轨道的交汇区域节点,  $p \in P_p, p \in P$ 。  $T$  为变迁集,用于描述小车或升降机的行为事件,如接受调度层下达的指令、装载/卸载货物、传送货物

等,  $t \in T$ ; 托肯代表 AVS/RS 中的 RGV、升降机以及控制指令; 小托肯颜色代表小车运行的路径,其他参照文献[14]。在建模前,先明确以下几个概念。

**定义 1**  $t_{i,m} \in T, p_i, p_m \in P_p (i, m \in N, i \neq m)$ , 则  $M(p_i) = k$  表示  $p_i \in P_p$  中有托肯且颜色为  $k$ ; 托肯的颜色表示为  $k = Co(token_k) = (p_i, p_m, \dots), k = 1, 2, \dots, L, L$  为 AVS/RS 中小车数量;  $Co(p_i) = \{c_1, c_2, \dots, c_u\}$ ,  $u$  为  $p_i$  中可能经过的小车的数量;  $Co(t_i) = \{c_1, c_2, \dots, c_c\}$ ,  $c$  为  $t_i$  中可能的小车数量;  $C^-(p_i, t_{i,m})(c) = \langle p_i, p_m \rangle C^+(p_m, t_{i,m})(c) = Co(p_i) - \langle p_i \rangle$  表示输入输出函数的颜色。

**定义 2**  $M(p_i) = \langle p_i \rangle$  代表以下情况: 小车在  $p_i \in P_p$  中且空闲; 升降机在  $p_i \in P_p$  中且空闲。

CTPN 通过增加颜色属性扩展了 Petri 网元组,引入颜色属性,简化了那些具有相同或者类似结构的系统 Petri 网图形。在宏观结构方面,AVS/RS 每层的货架结构是相同的,应用着色 Petri 网分析方法可以构建出相对简单直观模型;然而从微观角度考虑,为了描述 AVS/RS 每个节点小车通过的情况,有必要为这些节点增加相应的颜色属性,因此,在 CPTN 中的每个节点引入了可能的托肯颜色。在 CPTN 的基础上,本文提出了双重着色的概念。

**定义 3** 如果  $P_1 \subset P, P_1 = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}, n \in N, p_i \in P_1$  且  $Co(p_i) = \{c_1, c_2, \dots, c_u\}$ , 则  $P_1$  的颜色  $Co(P_1)$  为  $\langle p_1, p_2, \dots, p_n \rangle$ , 称为双重着色。

一般情况下<sup>[14]</sup>,对于每一变迁  $t_{i,m} \in T_{i,m}$ , 其使能条件为:  $M(p_m) = 0; (p_i) \neq ti(p_i); M(p_i) \geq C^-(p_i, t_{i,m})(c) = \langle p_i, p_m \rangle$ 。

如果  $t_{i,m} \in T_{i,m}$  使能,则新的状态标志  $M$  计算公式为  $M(p_m) = C^+(p_m, t_{i,m})(c) + M(p_m) = \langle p_m, \dots \rangle, M(p_i) = 0$ 。

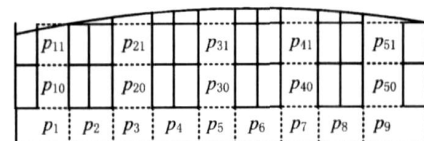


图3 AVS/RS某层标识简图

**例 1** 不失一般性,可假设图 2 中小车横向和纵向轨道均为单一轨道,且每层纵向货位均为两排。图 3 所示为某一层的标识简图,因空间限制省略了货位的标识。根据上述建模方法,可构建该层的 CTPN 模型,如图 4 所示。为便于表达,在此省略了抑制弧的标示。空白库所为货位,在 CTPN 模型

中,可把所有的货位看成是一个库所,其容量函数为整个 AVS/RS 的容量,  $p_L$  为升降机位置库所。事实上,当描述整个系统的 CTPN 模型时,图 4 中的每个库所可以表示各层对应物理位置集合,相应的库所和变迁一维矩阵,矩阵元素为每层对应的单一库所,如  $Co(p_1) = \{p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}\}$ ,  $n$  为 AVS/RS 层数;而

这些库所集中每个库所又有自身的颜色集,即可能通过的小车路径颜色集,这就是本文提出的双重着色。为便于下文讨论,可选取 AVS/RS 中一层进行分析,图 4 中每个库所表示单一的位置;空白库所表示该层货位容量,即单一的库所。为形象地描述,可把该库所分别描述在 CTPN 模型相应的位置。

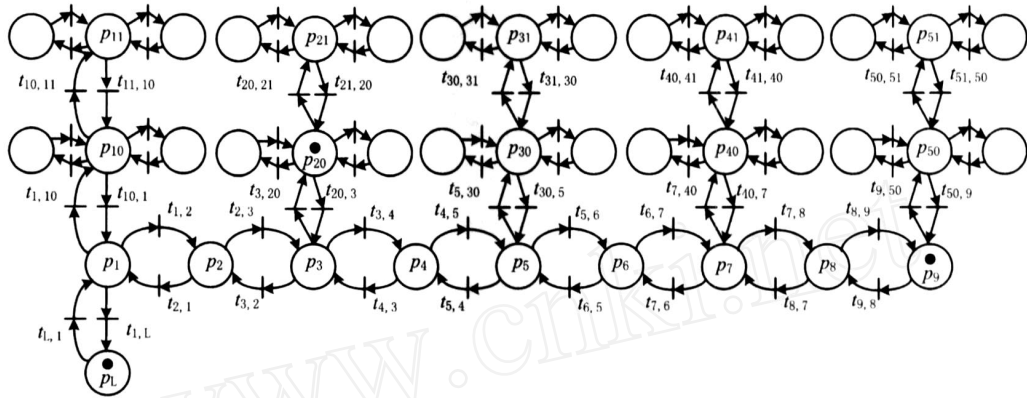


图4 AVS/RS某层的CTPN模型

在图 4 中,如果在该层有三辆小车  $V_1, V_2, V_3$  作业,且  $\alpha_1 = (p_L, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_{30})$ ,  $\alpha_2 = (p_9, p_8, p_7, p_6, p_5, p_4, p_3, p_2, p_1, p_{10})$ ,  $\alpha_3 = (p_{20}, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_{40})$ , 则  $Go(p_i) = \{\alpha_1, \alpha_2\}$ ,  $i = 1, 2$ ;  $Go(p_i) = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3\}$ ,  $i = 3, 4, 5$ ;  $Go(p_i) = \{\alpha_2, \alpha_3\}$ ,  $i = 6, 7$ ;  $Go(p_i) = \{\alpha_1\}$ ,  $i = L, 40$ ;  $Go(p_i) = \{\alpha_2\}$ ,  $i = 8, 9, 10$ ;  $Go(p_i) = \{\alpha_3\}$ ,  $i = 20, 50$ ; 初始标识为  $M(p_9) = 2$ ,  $M(p_L) = 1$ ,  $M(p_{20}) = 3$ 。因为 AVS/RS 中 RGV 的运动是并发的,从图 4 可以看出,如果不外加控制,则小车  $V_1, V_3$  与  $V_2$  势必将发生死锁,所以在 AVS/RS 中需要对 RGVs 进行死锁控制。

## 4 死锁控制

### 4.1 轨道导引小车系统死锁条件与路径图

Petri 网的死锁或冲突通过活性分析来判断,而活性分析通常采用可达图或者可达树来实现。然而对于 AVS/RS 而言,其库所集  $P$  通常达到近万个甚至更多,但真正运行在其中的托肯数(如自动小车)却只有几个或者十几个,因此采用 Petri 网可达图分析死锁是非常复杂的。从以上分析可知,小车的运行路径是引发死锁现象的根本因素,可考虑从这些运行路径来分析 RGVs 的死锁和冲突,而与这些路径无关的库所和变迁都可以暂不考虑,以简化计算上的复杂度。

有向图被认为是良好的资源分析工具,文献[8]利用 CPN 构建了列车运行模型,并引入路径图和变

迁图分析了列车轨道路径的死锁问题,而且对于多容量资源控制系统,还提出了防止一级死锁和二级死锁的约束条件。本文利用前面构建的 CTPN 模型,并结合有向图方法来分析 RGVs 死锁现象。考虑到有向路径图形象直观,适合描述 RGVs 的小车路径,下文仍然引用文献[7]对有向路径图的定义。另外,在 AVS/RS 中, RGV 是双向运行的,从图 4 中可以看出,如果几辆小车产生死锁现象,则由这些小车的路径组成的有向路径图必然存在一系列的特殊回路——环路。下文将从这些环路着手,进一步分析有向路径图中的环路和环路链与死锁的关系,推导出 RGVs 的无死锁条件。

有向图  $G = (V, E)$ ,  $V$  为图  $G$  所有顶点的非空集合,而  $E$  为  $G$  所有有向弧的集合。如果  $G$  中有一路径从  $p_i$  到  $p_j$ ,  $p_i, p_j \in V$ , 则称  $p_i$  到  $p_j$  可达;如果从  $p_i(p_j)$  到  $p_j(p_i)$  可达,则称  $p_i$  和  $p_j$  相互可达。

**定义 4** 如果有向图  $G$  中两相邻的顶点  $p_i, p_j \in V$  相互可达,则由  $p_i$  和  $p_j$  构成的子图  $G_c = (V_c, E_c)$  称为环路。

**定义 5** 如果有向图  $G$  中  $p_1$  和  $p_2$ ,  $p_2$  和  $p_3$ ,  $\dots$ ,  $p_{n-1}$  和  $p_n(p_1, p_2, \dots, p_n \in V, n > 2)$  相互可达,则这些顶点构成的子图  $G_{cc} = (V_{cc}, E_{cc})$  称为环路链。

**定义 6** 如果  $k = (\dots, p_i, p_j, \dots)$ , 则使用  $p_i \triangleright_k p_j$  表示  $p_j$  对应  $k$  中  $p_i$  的紧接位置,  $D$  表示其集合。

**定义 7** 给定 CTPN =  $(P, T, Co, Inh, C^+, C^-)$ ,



**定义 11** 给定路径图  $G_R = (V_R, E_R)$ ,  $e_{i,j} \in E_R$ ,  $p_i, p_j \in V_R$ , 如果  $k \in Co(p_i)$ , 其中  $k = (\dots, p_i, p_j, \dots)$ , 且

- (1) 对于环路  $G_C = (V_C, E_C)$   $G_C: p_i \in V_C, p_j \in V_C, e_{i,j} \in E_C, k \in d(G_C)$ ;
- (2) 对于有向颜色环路链  $G_{CC} = (V_{CC}, E_{CC}): k \in d(G_{CC}), p_i \in V_{CC}, p_j \in V_{CC}, e_{i,j} \in E_{CC}$ 。

则称  $e_{i,j}$  为环路  $G_C$  (有向颜色环路链  $G_{CC}$ ) 的颜色  $k$  输入弧, 对应 CTPN 中的变迁  $t_{i,j}$  称为环路  $G_C$  (有向颜色环路链  $G_{CC}$ ) 的颜色  $k$  输入变迁, 另外称  $p_i$  为颜色  $k$  输入库所。

**推论 1** 根据定义 11 可知, 对于任意环路  $G_C$  或者环路链  $G_{CC}$ , 至少存在两个输入库所。因为任意一个环路或者环路链至少由两辆小车路径组成, 根据 CTPN 模型定义, 每辆小车路径均为一颜色, 而路径是由库所系列组成, 所以环路或者环路链的输入库所至少存在两个。

为防止 RGVs 路径死锁, 还需要分三种情况讨论所有路径图中输入变迁使能条件:

(1) 对于任意环路  $G_C$  ( $G_C = G_{CC} = \emptyset$ ) 的输入变迁  $t_{i,j}$  ( $M(p_i) = k$ ), 如果所有的环路均满足

$$\begin{cases} N_n^+ = N_n^- = 0; \\ N_n^+ = 1, N_n^- = 0, k \in d^+(G_{Cn}); \\ N_n^- = 1, N_n^+ = 0, k \in d^-(G_{Cn}). \end{cases} \quad (2)$$

式中  $n$  为环路编号, 则该变迁在  $M(p_i) = k$  时对于颜色  $k$  使能。

(2) 对于任意有向颜色环路链 (不含环路) 的输入变迁  $t_{i,j}$  ( $M(p_i) = k$ ), 如果所有的有向颜色环路链均满足

$$\begin{cases} N_m^+ = N_m^- = 0; \\ N_m^+ = 1, N_m^- = 0, k \in d^+(G_{CCm}); \\ N_m^- = 1, N_m^+ = 0, k \in d^-(G_{CCm}). \end{cases} \quad (3)$$

式中  $m$  为环路链编号, 则该变迁在  $M(p_i) = k$  时对于颜色  $k$  使能。

(3) 对于  $M(p_i) = k, k \in C(G_C)$  且  $k \in C(G_{CC})$ , 如果所有与  $k$  关联的环路和有向颜色环路链均满足式 (2) 和式 (3), 则该变迁在  $M(p_i) = k$  时对于颜色  $k$  使能。

(4) 临界状态的控制策略。

先定义 RGV 冲突的有关概念。

**定义 12** 给定路径图  $G_R = (V_R, E_R)$ ,  $p_i, p_j, p_m, p_n, p_k, \dots \in V_R$  (其中  $p_i \neq p_j$ ), 且有 RGV 路径为  $M(p_i) = k_1 = (p_i, p_k, p_m, \dots)$ , 与  $M(p_j) = k_2 =$

$(p_j, p_k, p_n, \dots)$ , 如果  $p_m = p_j$  且  $p_n = p_i$ , 则称库所  $p_k$  为关于颜色  $k_1, k_2$  的冲突库所, 称对应的  $p_i, p_j$  分别为关于颜色  $k_1, k_2$  的冲突输入库所。

**推论 2** 对于定义 12, 如果  $p_m = p_j$  或者  $p_n = p_i$ , 则路径  $k_1$  和  $k_2$  之间至少存在一环路。

冲突控制策略指在 RGVs 实际控制过程中, 对于冲突现象, 采用任务时间优先原则, 即小车携带的最早生成时间任务优先服务。由于在 AVS/RS 中, 出入库任务的产生有先后顺序, 先到先服务 (First Come First Service, FCFS) 符合实际控制需要。根据上述原理, 可得出以下环路和环路链临界状态的控制策略。

给定路径图  $G_R = (V_R, E_R)$ , 对于任意环路  $G_C$  (或环路链  $G_{CC}$ ), 如果其输入库所  $p_i, p_j$  中存在  $M(p_i) = k_1, M(p_j) = k_2, k_1$  和  $k_2$  为 RGV 编号, 其中  $k_1 \in d^+(G_C), k_2 \in d^-(G_C)$  (或  $k_1 \in d^+(G_C), k_2 \in d^-(G_C)$ ), 则称其为环路 (或环路链) 临界状态。

环路 (或环路链) 临界状态控制策略: 设  $t(k_1), t(k_2)$  为环路 (或环路链) 临界状态路径  $k_1, k_2$  的生成时间, 如果  $t(k_1) > t(k_2)$ , 则颜色  $k_1$  对应的输入变迁首先获得使能标志。

#### 4.3 死锁控制算法

根据以上对 AVS/RS 的 RGVs 死锁控制分析, 给出下面的控制算法:

**步骤 1** 根据  $M(p)$  和定义 7 建立 RGVs 的路径图, 完成初始化。

**步骤 2** 根据定义 8 及定义 9 找出路径图中的环路和有向颜色环路链数量  $n$  和  $m$ , 并分别标识为  $G_{Ci}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $G_{CCj}$  ( $j = 1, 2, \dots, m$ ), 注意  $G_{Ci} \in G_{CCj}$ ; 分别计算这些环路和有向颜色环路链的方向颜色  $d^+(G_C), d^-(G_C), d^+(G_{CC})$  和  $d^-(G_{CC})$ 。

**步骤 3** 根据定义 10, 计算这些环路和有向颜色环路链的  $C(G_C)$  和  $C(G_{CC})$ , 以及它们与方向颜色的映射, 即  $N_i^+$  与  $N_i^-$ ,  $N_j^+$  与  $N_j^-$ ; 然后根据式 (1) 判断 RGVs 是否死锁, 若是则提示出错, 结束操作; 否则继续。

**步骤 4** 根据定义 11, 判断当前的变迁是否属于输入变迁, 如果是则判断其所在的环路或者环路链上是否处于临界状态, 若是则转入步骤 5, 否则转步骤 6。

**步骤 5** 根据环路和环路链的临界状态控制策略, 选择任务路径生成时间最早的小车前行。

**步骤 6** 根据式 (2) 和式 (3) 判断相应的输入变

迁使能条件。

**步骤 7** 如果 RGVs 的路径图更新,则返回步骤 1,否则返回步骤 4。

算法的复杂度分析:

死锁检测与消除是个实时监控的过程,因此对于死锁控制算法来说,它的计算复杂度就显得非常重要了。以上算法的计算复杂度是比较低的,实际上它只需要搜索出在双向运行轨道上 RGVs 的所有路径长度之和  $X$ ,当有  $n$  辆小车运行于系统中时,可能构成的环路,环路链时间复杂度为分别为  $O(nX)$ ,  $O((n-1)!)。$ 此外,还应该考虑 RGV 也有可能发生冲突,但是这种情况同时并发的数量一般不多,可设为  $O(n)$ ,则总的时间复杂性为  $T(n) = O(nX + (n-1)! + n)$ 。从上式可以得出,当 RGVs 路径图重新更新时,死锁的检测就需要较多的时间来计算新的路径图中是否有环路及环路链的存在。

#### 4.4 实例分析

下面以图 5 作为例,针对环路死锁的形式和临界状态进行分析。

图 5 中有向颜色环路链共有两个:  $G_{cc1} = \{G_{c1}, G_{c2}, G_{c3}, G_{c4}\}$ ,  $d^+(G_{cc1}) = \{1\}$ ,  $d^-(G_{cc1}) = \{2\}$ ;  $G_{cc2} = \{G_{c3}, G_{c4}, \dots, G_{c6}\}$ ,  $d^+(G_{cc2}) = \{3\}$ ,  $d^-(G_{cc2}) = \{2\}$ ,且不存在独立的环。其中  $G_{cc1}$  关于 1 的输入变迁为  $t_{L,1}$ ,关于 2 的输入变迁为  $t_{6,5}$ ;而  $G_{cc2}$  关于 3 的输入变迁为  $t_{20,3}$ ,关于 2 的输入变迁为  $t_{8,7}$ 。计算  $G_{cc1}$  和  $G_{cc2}$  的  $N_i^+$  与  $N_i^-$  为:  $N_1^+ = 0$ ,  $N_1^- = 0$ ,  $N_2^+ = 0$ ,  $N_2^- = 0$ 。另外,由于  $M(p_L) = 1$ ,  $M(p_{20}) = 3$ ,  $M(p_9) = 2$ ,根据上述三种情况分析可知,变迁  $t_{L,1}$  和  $t_{20,3}$  使能,小车  $V_1$  和  $V_3$  将分别进入环路链  $G_{cc1}$  和  $G_{cc2}$ ,且系统不会产生死锁现象;对于小车  $V_2$ ,在  $V_1$  和  $V_3$  离开  $G_{cc1}$  和  $G_{cc2}$  之前不能进入这两个环路链。

另一种情况,若小车  $V_2$  到达库所  $p_8$ ,则 CTPN 模型的标志为  $M(p_L) = 1$ ,  $M(p_{20}) = 3$ ,  $M(p_8) = 2$ ,按照上述控制策略,因为  $N_1^+ = 0$ ,  $N_1^- = 0$ ,  $N_2^+ = 0$ ,  $N_2^- = 0$ ,所以输入变迁  $t_{20,3}$ ,  $t_{8,7}$  可以同时使能。一旦这些变迁激发,小车  $V_2$  和  $V_3$  同时进入环路链  $G_{cc2}$ ,这样  $V_2$  和  $V_3$  必然在环路链  $G_{cc2}$  上进入死锁状态,此时达到系统的临界状态。根据上文提出的临界状态控制策略,  $\min(t(2), t(3))$  输入变迁应首先获得使能标志。

## 5 结束语

本文提出了应用双重着色的 CTPN 构建 AVS/

RS 动态模型的方法。在此基础上,以一类采用可双向运行的 RGV 和单一轨道的 AVS/RS 为研究对象,探讨其路径死锁控制问题。与多容量资源控制系统的无死锁控制策略不同,单容量资源控制系统需要独立考虑其无死锁运行的条件。本文结合有向图工具,阐述了 RGVs 路径死锁的成因—环路死锁,给出了系统环路无死锁的条件,并提出了可靠的无环路死锁的控制策略,从而解决了严格死锁问题。

#### 参考文献:

- [1] MALMBORG C J. Conceptualizing tools for autonomous vehicle storage and retrieval systems [J]. International Journal of Production Research, 2002, 40(8):1807-1822.
- [2] MIKI F. Analytical foundations for autonomous vehicle storage and retrieval systems using load transfer station based dwell point strategies [D]. New York, N. Y., USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 2005.
- [3] MALMBORG C J. Design optimization models for storage and retrieval systems using rail guided vehicles [J]. Applied Mathematical Modeling, 2003, 27(12):929-941.
- [4] MALMBORG C J. Interleaving dynamics in autonomous vehicle storage and retrieval systems [J]. International Journal of Production Research, 2003, 41(5):1057-1069.
- [5] KUO P H. Modeling and analysis of autonomous vehicle storage and retrieval systems [D]. New York, N. Y., USA: Rensselaer Polytechnic Institute, 2005.
- [6] LIN S C, WANG H-P B. Modeling an automated storage and retrieval system using Petri nets [J]. International Journal of Production Research, 1995, 33(1):237-260.
- [7] HSIEH S, HWANG J S, CHOU H C. A Petri net based structure for AS/RS operation modeling [J]. International Journal of Production Research, 1998, 36(12):3323-3346.
- [8] BASILE F, CARBONE C, CHIACCHIO P. Modeling of AS/RS via colored Petri nets [C]// Proceedings of 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Washington, D. C., USA: IEEE, 2001:1029-1034.
- [9] TIAN Guohui, LIU Changyou, XU Xinhe. Research on scheduling problem of transporting process in the automatic warehouse [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 1998, 4(2):51-54(in Chinese). [田国会,刘长友,徐心和. 自动化仓库输送过程调度问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 1998, 4(2):51-54.]
- [10] CHANG Faliang, LIU Changyou. The study of optimal Simulation and its application in vehicle scheduling for automatic space warehouse [J]. Journal of System Simulation, 1998, 10(5):14-19(in Chinese). [常发亮,刘长友. 自动化立体仓库输送系统调度的优化仿真及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 1998, 10(5):14-19.]
- [11] XU Ling. Study on control and management techniques of complete equipment of modern manufacturing logistics [D].



Chengdu:Southwest Jiaotong University ,2006(in Chinese).  
[徐 菱.现代生产物流成套设备系统管理与监控的关键技术研究[D].成都:西南交通大学,2006. ]

[12] ZHU Huabing. Research on planning and scheduling technology of manufacturing production logistics system [D]. Hefei : Hefei University of Technology ,2005 (in Chinese). [朱华炳.制造业生产物流系统规划与调度技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2005. ]

[13] DOTOLI M, FANTI M P. Modeling of an AS/ RS serviced by rail-guided vehicles with colored Petri nets:a control perspective[C]// Proceedings of 2002 IEEE International Conference on Systems , Man and Cybernetics. Washington , D. C . , USA :IEEE , 2002:162-167.

[14] HE Shanjun, CHENG Fei, LUO Jian. Modeling and implementing of an automated warehouse via colored timed Petri nets —a behavior perspective[C]// Proceedings of thd 6th International Conference on Control and Automation. Washing-

ton , D. C . , USA :IEEE , 2007 :2823-2828.

[15] FANTI M P. Event-based controller to avoid deadlock and collisions in zone control AGVS[J]. International Journal of Production Research , 2002 , 40(6) :1453-1478.

[16] REVELIOTIS, SPYROS A. Conflict resolution in AGV systems[J]. IIE Transactions , 2000 , 32(7) :647-659.

[17] WU N Q, ZHOU M C. Deadlock modeling and control of automated guided vehicle systems[J]. IEEE/ ASME Transactions on Mechatronics , 2004 ,9(1) :50-57.

[18] DOTOLI M, FANTI M P. Deadlock detection and avoidance strategies for automated storage and retrieval systems [J]. IEEE Transactions on Systems , Man and Cybernetics —C: Applications and Reviews , 2007 , 37(4) :541-552.

[19] FANTI M P, GIUA A,SEATZU C. Monitor design for colored Petri nets:an application to deadlock prevention railway networks[J]. Control Engineering Practice ,2006 , 14 (10) : 1231-1247.

(上接第 1751 页)

[14] SHI Ruiheng. Studies on multi-objective evolutionary algorithms with applications to production scheduling [D]. Beijing:Beihang University , 2006(in Chinese). [师瑞峰. 多目标进化算法研究及其在生产排序中的应用 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2006. ]

[15] PINEDO M. Scheduling :theory , algorithms , and systems[ M]. 2nd ed. Upper Saddle , N. J. , USA :Prentice- Hall , 2002.

[16] TAILLARD E. Some efficient heuristic methods for the flow shop sequencing problem[J]. European Journal of Operational Research , 1990 , 47(1) :65-74.

[17] HASJIA S, RAJENDRAN C. Scheduling in flowshops to minimize total tardiness of jobs[J]. International Journal of Production Research , 2004 , 42(11) :2289-2301.

[18] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm:NSGA- [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation , 2002 , 6(2) :182-197.

过 刊 信 息

本编辑部现余过刊若干,清单如下。有需要的读者请尽快与编辑部联系。  
通信地址:北京 2413 信箱 34 分箱 CIMS 编辑部(100089) 电 话:010 - 68962468

年 份	1996	1997	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
现存期刊(期)	1,2,4	1~3,5	3~6	全年 1~6	全年 1~12	全年 1~12	全年 1~12	全年 1~12	全年 1~12	全年 1~12	全年 1~12
定 价	5 元/ 本				8 元/ 本	12 元/ 本	12 元/ 本	15/ 本	20/ 本	20/ 本	28/ 本